**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

José Nuno Almeida Dias Bueno

**Controle robusto para robô manipulador espacial planar
de base livre flutuante com dois braços**

São Carlos

2017

José Nuno Almeida Dias Bueno

**Controle robusto para robô manipulador espacial planar
de base livre flutuante com dois braços**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Dinâmicos

Orientador: Prof. Dr. Valdir Grassi Jr

**São Carlos
2017**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B928c Bueno, José Nuno Almeida Dias
 Controle robusto para robô manipulador espacial
 planar de base livre flutuante com dois braços / José
 Nuno Almeida Dias Bueno; orientador Valdir Grassi Jr.
 São Carlos, .

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
 Sistemas Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, .

 1. Sistemas robóticos. 2. Manipuladores espaciais.
 3. Controle robusto. 4. Regulador Recursivo Robusto. 5.
 Manipulador dinamicamente equivalente. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: **JOSÉ NUNO ALMEIDA DIAS BUENO**

Título da dissertação: "Controle robusto para robô manipulador espacial planar de base livre flutuante com dois braços"

Data da defesa: 21.07.2017

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Valdir Grassi Junior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Profª. Drª. **Maíra Martins da Silva**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profª. Drª. **Tatiana de Figueiredo Pereira Alves Taveira Pazelli**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

*Este trabalho é dedicado aos meus familiares,
aos meus verdadeiros amigos
e a todos os que me apoiaram nessa caminhada.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me manter no caminho correto.

Aos meus pais Nuno e Lourdes, pelo constante apoio e compreensão.

Ao meu irmão Raul, pelo incentivo e paciência.

A todos os familiares que sempre torceram por mim.

Aos amigos que me apoiaram durante todo o programa de Mestrado, em especial Renzo, Rodolpho, Fabrício, Ronaldo e Breno pelo constante incentivo, compreensão, paciência e preciosos momentos de descontração.

Aos amigos do LASI, pela agradável convivência, tranquilidade, suporte em momentos difíceis e conversas produtivas.

Ao Professor Valdir Grassi Jr, pela oportunidade, orientação e dedicação durante todo o projeto.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, por despertarem minha curiosidade e prazer em estudar.

À CAPES, pelo apoio financeiro durante todo o projeto.

“Não é na ciência que está a felicidade, mas na aquisição da ciência.”

Edgar Allan Poe

RESUMO

BUENO, J. **Controle robusto para robô manipulador espacial planar de base livre flutuante com dois braços**. 2017. 71p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Manipuladores robóticos têm ganhado cada vez mais importância em operações espaciais por poderem substituir humanos na realização de tarefas perigosas ou demasiadamente demoradas e repetitivas. Em destaque tem-se os manipuladores de base livre, por poderem ser acoplados a satélites ou estações espaciais e representarem um grande desafio para engenheiros de controle. Tais robôs possuem dois modos de operação: com base livre controlada e com base livre flutuante. No primeiro modo a base do manipulador tem atitude e translação controladas por jatos propulsores ou rodas de reação, de modo que o comportamento do robô se aproxima de um manipulador de base fixa. Porém, há um considerável consumo de combustível e energia elétrica, além de novos distúrbios que são inseridos no sistema. No segundo modo, considerado neste trabalho de mestrado, os controles da base são desligados durante a operação e ela pode mover-se livremente em resposta aos movimentos do braço. Embora tenha-se notável economia de combustível e energia elétrica, o acoplamento dinâmico entre base e braço deve ser considerado tanto na modelagem como no projeto do controlador. Para modelar o robô espacial considerado neste projeto foi aplicado o método do Manipulador Dinamicamente Equivalente, que mapeia um manipulador de base livre flutuante através de um robô sub-atuado de base fixa. Dessa forma é possível utilizar sobre robôs espaciais técnicas de controle já desenvolvidas para manipuladores terrestres. Este trabalho trata da análise de controladores robustos e adaptativo aplicados sobre um manipulador planar de base livre flutuante com dois braços para realizar a tarefa de seguimento de trajetórias definidas no espaço de tarefa. Os sistemas de controle considerados foram: Regulador Linear Quadrático Recursivo Robusto (RLQR), controlador H-infinito robusto e controlador adaptativo com modos deslizantes. Os resultados mostraram que os controladores apresentaram desempenhos distintos mas ainda assim foram capazes de realizar a tarefa de seguir trajetórias no espaço de trabalho com erros de acompanhamento bastante pequenos. Foi elaborada também uma comparação quantitativa através de índices de desempenho considerando integral de torques e norma $\mathcal{L}_2$ de erros de acompanhamento.

Palavras-chave: Sistemas robóticos. Manipuladores espaciais. Controle robusto. Regulador recursivo robusto. Manipulador dinamicamente equivalente.

ABSTRACT

BUENO, J. **Robust control for planar dual-arm free-floating space manipulator**. 2017. 71p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Robotic manipulators gained greater importance in space operations by being able to replace humans in dangerous or very long and repetitive tasks. Free-floating manipulators are highlighted, because they can be coupled to satellites or space stations and represent a great challenge to control engineers. These robots have two operation modes: controlled base and free-floating base. In the first mode, the base has its attitude and translation controlled by propulsion jets or reaction wheels, so that the robot behavior is similar to a fixed-base manipulator. However, there is considerable fuel and electrical energy consumption, besides additional disturbances inserted in the system. In the second mode, which is considered in this work, the base is not controlled during operation and is able to move freely in response to movements of the arm. Even though there is a remarkable fuel and electrical energy saving, the dynamic coupling between base and arm must be taken into account during modelling and controller design. To model the space manipulator considered in this work the Dynamically Equivalent Manipulator method was used, which maps a free-floating manipulator into a underactuated fixed-base manipulator. Thus, it is possible to apply known control techniques for terrestrial manipulators on free-floating ones. This work discusses robust and adaptive controllers applied on a planar dual-arm free-floating space manipulator in order to track trajectories defined in the workspace. The considered control systems are: Robust Recursive Linear Quadratic Regulator, Robust H-infinity and Adaptive Sliding Modes. Results showed that the controllers had distinct performances but were still able to perform trajectory tracking in workspace with very small tracking errors. A quantitative comparison was also elaborated with performance indexes considering integral of torques and $\mathcal{L}_2$ norm of tracking errors.

Keywords: Robotic systems. Space manipulators. Robust control. Robust recursive regulator. Dynamically equivalent manipulator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manipulador de base livre flutuante com dois braços.	30
Figura 2 – Manipulador planar horizontal UarmII.	30
Figura 3 – Manipulador de base livre flutuante (MBLF) e o MDE que o mapeia. .	32
Figura 4 – Parâmetros geométricos dos elos do MBLF e do MDE, respectivamente.	33
Figura 5 – Manipulador de base livre flutuante com dois braços.	35
Figura 6 – Manipulador de base flutuante com dois braços junto com os MDEs que mapearão os dois efetuadores.	36
Figura 7 – Ângulos da convenção de Denativ-Hartenberg medidos no MBLF. . . .	37
Figura 8 – Ângulos da convenção de Denativ-Hartenberg para o MDE1.	37
Figura 9 – Ângulos da convenção de Denativ-Hartenberg para o MDE2.	37
Figura 10 – Diagrama de blocos da estrutura de controle proposta para os manipu- ladores dinamicamente equivalentes.	43
Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de controle.	50
Figura 12 – Movimentação desejada para os efetuadores EF1 e EF2.	52
Figura 13 – Torques de distúrbio a serem aplicados nas juntas do MDE.	52
Figura 14 – Trajetória das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso nominal.	54
Figura 15 – Torques aplicados nas juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso nominal.	54
Figura 16 – Velocidade angular das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso nominal.	55
Figura 17 – Trajetória das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	55
Figura 18 – Torques aplicados nas juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	56
Figura 19 – Velocidade angular das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	56
Figura 20 – Trajetória das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso nominal.	58
Figura 21 – Torques aplicados nas juntas com o controle por modos deslizantes. Caso nominal.	58
Figura 22 – Velocidade angular das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso nominal.	59
Figura 23 – Trajetória das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	59
Figura 24 – Torques aplicados nas juntas com o controle por modos deslizantes. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	60

Figura 25 – Velocidade angular das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	60
Figura 26 – Valores singulares para W_e^{-1} e $S(s)$	61
Figura 27 – Valores singulares para W_Δ^{-1} e $T(s) = K_\infty S(s)$	62
Figura 28 – Trajetória das juntas com o controlador H-infinito. Caso nominal. . . .	62
Figura 29 – Torques aplicados nas juntas com o controlador H-infinito. Caso nominal.	63
Figura 30 – Velocidade angular das juntas com o controlador H-infinito. Caso nominal.	63
Figura 31 – Trajetória das juntas com o controlador H-infinito. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	64
Figura 32 – Torques aplicados nas juntas com o controlador H-infinito. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	64
Figura 33 – Velocidade angular das juntas com o controlador H-infinito. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.	65
Figura 34 – Movimento realizado pelo manipulador espacial planar de base livre flutuante com dois braços.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros estruturais do manipulador de base livre com dois braços real.	36
Tabela 2 – Equivalências entre elos do manipulador de base livre real e dos MDEs	38
Tabela 3 – Equivalências entre juntas do manipulador de base livre real e dos MDEs	38
Tabela 4 – Equivalências entre ângulos das juntas do manipulador de base livre real e dos MDEs	38
Tabela 5 – Equivalências entre torques nas juntas do manipulador de base livre real e dos MDEs	38
Tabela 6 – Parâmetros estruturais calculados para o MDE1	39
Tabela 7 – Parâmetros estruturais calculados para o MDE2	39
Tabela 8 – Erros máximos absolutos obtidos com o Regulador Recursivo Robusto.	53
Tabela 9 – Erros máximos absolutos obtidos com o controle por modos deslizantes.	57
Tabela 10 – Erros máximos absolutos obtidos com o controlador H-infinito.	61
Tabela 11 – Índices de performance.	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MBLF	Manipulador de base livre flutuante
MDE	Manipulador dinamicamente equivalente
MDE1	Manipulador dinamicamente equivalente 1
MDE2	Manipulador dinamicamente equivalente 2
EF1	Efetuator 1
EF2	Efetuator 2
RLQR	Regulador Linear Quadrático Recursivo Robusto

LISTA DE SÍMBOLOS

W_i	comprimento do i-ésimo elo do MBLF
W'_i	comprimento do i-ésimo elo do MDE
J_i	i-ésima junta do MBLF
J'_i	i-ésima junta do MDE
L_i	distância da i-ésima junta até o centro de massa do i-ésimo elo do MBLF
R_i	distância do centro de massa do i-ésimo até a junta J_{i+1} elo do MBLF
l'_i	distância da i-ésima junta até o centro de massa do i-ésimo elo do MDE
u_i	eixo de rotação da i-ésima junta do MBLF
u'_i	eixo de rotação da i-ésima junta do MDE
M_t	massa total do MBLF
m_i	massa do i-ésimo elo do MBLF
m'_i	massa do i-ésimo elo do MDE
I_i	momento de inércia do i-ésimo elo do MBLF
I'_i	momento de inércia do i-ésimo elo do MDE
q_i	posição angular da i-ésima junta do MBLF
q'_i	posição angular da i-ésima junta do MDE1
q''_i	posição angular da i-ésima junta do MDE2
D	matriz de inércia simétrica definida positiva
V	vetor de forças centrífugas e de Coriolis
τ	vetor de torques atuando sobre as juntas do MBLF
τ'	vetor de torques atuando sobre as juntas do MDE1
τ''	vetor de torques atuando sobre as juntas do MDE2
θ_i	ângulo da i-ésima junta do MBLF
θ'_i	ângulo da i-ésima junta do MDE1

θ_i''	ângulo da i-ésima junta do MDE2
$\hat{J}$	Jacobiano Generalizado
J	matriz jacobiana
χ	vetor de velocidades do efetuador
x	vetor de estados do sistema
q_d	vetor com trajetórias de referência para as juntas
e	vetor de erro de seguimento de trajetória
τ_{dist}	vetor de torques de distúrbios aplicados nas juntas
u	sinal de controle
w	sinal de distúrbio
δF_i	porção incerta da matriz F_i do modelo em espaço de estados discretizado
δG_i	porção incerta da matriz G_i do modelo em espaço de estados discretizado
Q	matriz de ponderação do RLQR
R	matriz de ponderação do RLQR
L_i	matriz do sistema em malha fechada com RLQR
K_i	ganho ótimo de realimentação do RLQR
s	superfície deslizando
λ	constante de deslizamento
$Y(t, q, \dot{q})$	termo de distúrbios e incertezas
K_P	ganho proporcional
K_D	ganho derivativo
K_I	ganho do integrador
σ	constante de ganho adaptativo
W_e	matriz de ponderação de performance no domínio da frequência do H-infinito
W_Δ	matriz de ponderação de incertezas multiplicativas do H-infinito

S	função de sensibilidade
T	função de sensibilidade complementar
P	função de transferência da planta
T_{zw}	função de transferência entre erro e saída de distúrbio
γ	nível de atenuação
x_d	posição desejada no eixo x do espaço de trabalho
y_d	posição desejada no eixo y do espaço de trabalho

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	MANIPULADORES ESPACIAIS DE BASE LIVRE FLUTUANTE .	31
2.1	Características dinâmicas	31
2.2	Manipulador Dinamicamente Equivalente	32
2.3	Manipulador Sub-atuado	33
3	MODELAGEM DO MANIPULADOR ESPACIAL DE BASE LIVRE FLUTUANTE COM DOIS BRAÇOS	35
3.1	Modelos Dinamicamente Equivalentes	35
3.2	Jacobiano Generalizado	39
4	SISTEMAS DE CONTROLE	43
4.1	Formulação do problema	43
4.2	Regulador Recursivo Robusto	45
4.3	Adaptativo com Modos Deslizantes	47
4.4	H-infinito Robusto	48
5	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	51
5.1	Regulador Recursivo Robusto	53
5.2	Adaptativo com Modos Deslizantes	53
5.3	H-infinito Robusto	57
5.4	Discussão de resultados	65
6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Operações espaciais estão sujeitas a condições extremas de radiação, vácuo e temperatura, e isto representa um risco significativo para os astronautas durante a realização de atividades extra veiculares. Para evitar possíveis situações de perigo manipuladores acoplados à base espacial (satélite, estação espacial, etc) podem ser empregados para substituir o astronauta ao desempenhar tarefas como inspeção, manutenção e captura e transporte de objetos. Há na Estação Espacial Internacional (International Space Station – ISS) mais de 250 equipamentos que devem ser substituídos periodicamente durante suas vidas úteis, sendo assim uma tarefa de execução demasiadamente longa para humanos (HU et al., 2015). Por outro lado, os sistemas presentes na estação ainda necessitam de uma melhor precisão para poderem operar de forma autônoma. Atualmente a ISS é provida dos manipuladores Small Fine Arm, acoplado ao módulo Kibo, Canadarm2 e Special Purpose Dexterous Manipulator (SPDM/Dextre), que são controlados por astronautas para realizar tarefas de montagem, manutenção e reabastecimento (NASA, 2015).

Segundo a lei de ação e reação, os movimentos do manipulador espacial provocam mudanças na posição e orientação da base, e simultaneamente os movimentos da base interferem na precisão dos movimentos do manipulador (ZHENG CANG; YU QUAN; LUO, 2016). Este acoplamento dinâmico entre os membros do robô traz à tona grandes desafios no que diz respeito a sistemas de controle. Há então dois modos de operação: base livre controlada e base livre flutuante. No primeiro são utilizados sistemas para minimizar e até eliminar as reações da base devido aos movimentos do braço (SHI; KATUPITIYA; KINKAID, 2016), (WANG; XU, 2014). No segundo, os sistemas de controle da base são desligados durante a operação e ela se move livremente em resposta aos movimentos do braço (PAPADOPOULOS; DUBOWSKY, 1991). Este trabalho lida com sistemas de controle para o modo de operação em base livre flutuante, não considerando o modo com base livre controlada. Tal escolha foi motivada pelo fato de que, uma vez desligados os sistemas de controle de atitude e translação da base espacial, há uma significativa economia de baterias e combustível resultando em um robô com vida útil mais longa em órbita.

Testes experimentais com esses sistemas robóticos são bastante complexos uma vez que é necessário simular situações de micro gravidade em ambiente terrestre. Menon et al. (2007) estudou as seguintes plataformas de testes: voo parabólico; sistema de suspensão por molas; ambiente subaquático; e mesa de ar. O estudo concluiu que o sistema com mesa de ar é o mais adequado por simular eficientemente ambientes de micro gravidade, permitir testes de longa duração e atender aos critérios de robustez, viabilidade e ocupação de espaço físico. Porém, em tal plataforma é possível realizar testes apenas com manipuladores planares (plano horizontal) fazendo-se necessária a construção de modelos bastante específicos. A

plataforma experimental considerada neste trabalho de mestrado é a mesa de ar, sobre a qual é montado o manipulador de base livre flutuante com dois braços a ser apresentado nos capítulos seguintes.

Em robôs espaciais de base livre flutuante, singularidades dinâmicas, restrições não holonômicas e acoplamento dinâmico entre o braço e a base espacial devem ser considerados, e tais fatores representam dificuldades adicionais no processo de modelagem. É utilizado então o método do Manipulador Dinamicamente Equivalente proposto em Liang, Xu & Bergerman (1997) e Liang et al. (1997), que modela um manipulador de base livre flutuante com n juntas através de um manipulador de base fixa com $n + 1$ juntas e assegura equivalências cinemática e dinâmica. A junta adicional é fixada sobre o centro de massa do sistema real e é passiva, de modo que este método faz uma relação entre manipulador espacial e manipulador de base fixa subatuado e permite aplicar no primeiro os controladores desenvolvidos para o segundo.

Perante a existência do acoplamento dinâmico entre o braço e a base, e ainda do acoplamento entre juntas ativas e passiva do modelo dinamicamente citado anteriormente, autores resolveram o problema de seguimento de trajetória aplicando diversos sistemas de controle. Xu & Zhang (2011) propuseram um controlador robusto que utiliza o conceito de otimização por enxame de partículas para encontrar uma matriz para compensação de incertezas paramétricas combinado a um controlador PD. Simulações mostraram que o controlador proposto apresenta melhor desempenho quando comparado ao PD utilizado sem a compensação de incertezas, resultando em um menor erro de seguimento de trajetória e menores oscilações.

Em Henmi, Deng & Inoue (2010) foi proposto um sistema de controle que combina os métodos adaptativo e preditivo não linear para realizar o seguimento de trajetória em um manipulador planar. O algoritmo apresentado utiliza estados e entradas de controle passados para estimar os parâmetros incertos do sistema, e com estes são estimados os próximos torques a serem aplicados. Um revés do método proposto é a necessidade de que os parâmetros estimados não variem por pelo menos alguns períodos de amostragem, e é então analisada a variância das estimativas anteriores antes de se atualizar ou não os parâmetros incertos. Simulações com o sistema apresentado mostraram sobressinais e atrasos menores quando comparados ao controlador preditivo não linear sem controle adaptativo.

Em Perez, Pomares & Emami (2016) foi proposto um sistema de controle ótimo de torque baseado em imagens e minimizações de torques de controle para um manipulador montado em um satélite. Foi considerada uma câmera acoplada ao efetuador do manipulador para a extração de características das imagens captadas e utilizá-las no algoritmo de controle. Simulações com o controlador ótimo baseado em imagem proposto resultaram em erros de seguimento de trajetórias bastante pequenos, inclusive para trajetórias com

mudanças abruptas. Porém, simulações com incertezas e distúrbios não foram realizadas pelos autores.

Controladores por modos deslizantes foram propostos e analisados em Ouyang, Tang & Yue (2016), Nahavandi (2016), Wan et al. (2016) e Naghibi, Pirmohamadi & Moosavian (2016). Os Autores obtiveram resultados promissores combinando controladores PD e PID com modos deslizantes na realização de seguimento de trajetória em diferentes tipos de sistemas robóticos.

Além de seguimento de trajetória, manipuladores espaciais de base livre flutuante podem realizar capturas de objetos no espaço, o que os torna ainda mais interessantes para futuras missões. Em Wang et al. (2017), por exemplo, controles adaptativo e servo visual foram aplicados utilizando uma câmera acoplada ao efetuador e considerando observadores para estimar parâmetros dinâmicos incertos. Simulações mostraram que tal sistema de controle executou com sucesso a tarefa de captura de objetos de velocidade desconhecida tanto no caso de um manipulador planar como no caso tridimensional.

Este trabalho trata do problema de seguimento de trajetória para o manipulador planar de base livre flutuante com dois braços mostrado na Figura 1 e sujeito a distúrbios e incertezas paramétricas. Tal robô foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Inteligentes (LASI) e é descrito em detalhes no trabalho de Pazelli (2011). Nestes trabalhos foram estudados diversos tipos de sistemas de controle robustos e adaptativos para o robô UARM, mostrado na Figura 2, e para o manipulador da Figura 1 (PAZELLI, 2006), (PAZELLI; TERRA; SIQUEIRA, 2011). Os estudos comprovaram a eficiência dos controladores aplicados sobre os dois robôs considerados na solução do problema de seguimento de trajetória. Bezerra (2015) propôs um método de modelagem para o manipulador espacial na configuração com dois braços e quatro juntas (duas por braço), e implementou um simulador em Simulink com o qual foram extraídos resultados com controle PD para validar o modelo proposto.

A contribuição deste trabalho para o desenvolvimento do manipulador espacial planar de base livre flutuante com dois braços foi aplicar e avaliar os controladores RLQR (Regulador Linear Quadrático Recursivo Robusto) proposto por Terra, Cerri & Ishihara (2014), Adaptativo com Modos Deslizantes e H-infinito Robusto, com trajetórias definidas no espaço de trabalho dos efetuadores. As trajetórias tiveram seus pontos mapeados no espaço das juntas através do Jacobiano Generalizado, contornando assim o problema da cinemática inversa para um manipulador com vários graus de liberdade.

A dissertação está organizada da seguinte forma: no capítulo 2 é feita uma introdução sobre manipuladores de base livre flutuante e o método de modelagem utilizado; no capítulo 3 são tratados o processo de modelagem do manipulador de base livre flutuante com dois braços, o Jacobiano Generalizado, e também a forma como ele foi aplicado no projeto; o capítulo 4 apresenta a formulação do problema de seguimento de trajetória

Figura 1: Manipulador de base livre flutuante com dois braços.

Fonte: Pazelli (2011).

Figura 2: Manipulador planar horizontal UarmII.

Fonte: Pazelli (2006).

para o manipulador espacial e os controladores utilizados na realização de tal tarefa; no capítulo 5 são apresentados os parâmetros considerados para simulações, os resultados obtidos e uma comparação quantitativa dos mesmos; e finalmente no capítulo 6 são feitas conclusões sobre os métodos de modelagem e sistemas de controle e acerca dos resultados obtidos nas simulações.

2 MANIPULADORES ESPACIAIS DE BASE LIVRE FLUTUANTE

2.1 Características dinâmicas

A característica dinâmica de maior destaque do Manipulador de Base Livre Flutuante (MBLF) é o acoplamento dinâmico existente entre a base e o braço, ou seja, os movimentos do braço influenciam a posição e a orientação da espaçonave. Enquanto o manipulador opera no modo com base livre não há atuação dos controles de atitude e orientação da base de modo que são economizados combustível e energia elétrica. Por outro lado, uma considerável complexidade é adicionada no sistema uma vez que o acoplamento dinâmico acima citado passa a ser considerado na modelagem e no controle. Assim, algoritmos que ignoram a cinemática e a dinâmica da base livre não apresentam desempenho satisfatório devido a singularidades dinâmicas não existentes em manipuladores de base fixa (PAPADOPOULOS; DUBOWSKY, 1991). Segundo Yoshida (1997) tais singularidades ocorrem quando o jacobiano generalizado do sistema perde posto em alguma das configurações alcançadas pelo manipulador. Nessa situação o movimento do efetuador é prejudicado e ele fica impossibilitado de se mover em alguma direção, isto é, o manipulador perde um ou mais graus de liberdade.

O caminho percorrido pelo efetuador até à posição atual é determinante para a ocorrência de uma configuração singular. Como a base tem orientação e posição influenciadas pelo movimento do braço, se uma posição do efetuador resulta ou não em uma configuração singular depende do caminho pelo qual o efetuador passou até chegar à posição atual. Além disso, o fato de o Jacobiano do sistema depender das propriedades dinâmicas do robô faz com que propriedades cinemáticas não sejam suficientes para a implementação de um sistema de controle, como é o caso dos manipuladores de base fixa (PAPADOPOULOS; DUBOWSKY, 1991).

Sistemas de controle para robôs espaciais podem ser divididos em três categorias: na primeira a base tem orientação e posição controladas por jatos de propulsão; na segunda, são usadas rodas de compensação ou jatos para fazer o controle de atitude da espaçonave, mas não de sua translação; e na terceira, considerada neste trabalho, atitude e translação da base não são controladas, resultando em uma vantajosa economia de combustível e energia elétrica e aumentando a vida útil do sistema em órbita (PAPADOPOULOS; DUBOWSKY, 1991).

Dadas as dificuldades adicionais resultantes do acoplamento dinâmico entre braço e base na modelagem e na implementação do controle, foi utilizado o método do Manipulador Dinamicamente Equivalente, descrito na seção subsequente, para modelar o manipulador de base livre flutuante.

2.2 Manipulador Dinamicamente Equivalente

O Manipulador Dinamicamente Equivalente (MDE) proposto por Liang, Xu & Bergerman (1997) e Liang et al. (1997) faz o mapeamento de um MBLF através de um manipulador sub-atuado de base fixa com uma junta esférica passiva adicional fixada sobre o centro de massa do sistema real, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3: Manipulador de base livre flutuante (MBLF) e o MDE que o mapeia.

Fonte: Liang, Xu & Bergerman (1997).

A grande vantagem desse método está no fato de ele resultar em uma relação entre manipuladores espaciais e sub-atuados de base fixa, o que possibilita a realização de experimentos usando plataformas terrestres com sistemas de controle que serão aplicados em robôs espaciais de base livre flutuante. As seguintes propriedades cinemáticas são apresentadas pelo método de modelagem:

- Os eixos da i -ésima junta do MBLF e do MDE são paralelos;
- As variáveis q_i e q'_i que descrevem os movimentos da i -ésima junta do MBLF e do MDE, respectivamente, são iguais durante a operação;
- O efetuator do MDE será sempre coincidente com o do MBLF durante a operação.

Além das propriedades cinemáticas citadas, existe ainda uma relação entre parâmetros geométricos de ambos manipuladores necessária para garantir equivalência cinemática entre eles. Esta relação é mostrada na Figura 4 e definida pelas equações 2.1.

$$\begin{aligned}
 W'_1 &= R_1, \\
 W'_i &= R_i + L_i, \\
 l'_{c1} &= 0, \\
 l'_{ci} &= \frac{\sum_{k=1}^{i-1} m_k}{M_t} L_i,
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

onde $i = 2, \dots, n$, n é o número de juntas, M_t é a massa total do MBLF, m_k é a massa do k -ésimo elo do MBLF, W'_i é comprimento do i -ésimo elo do MDE, L_i é a distância do eixo da i -ésima junta até o centro de massa do i -ésimo elo do MBLF, R_i é a distância do centro de massa do i -ésimo elo até o eixo da $(i + 1)$ -ésima junta do MBLF, l'_{ci} é a distância do eixo da i -ésima junta até o centro de massa do i -ésimo elo do MDE, u_i é o eixo da i -ésima junta do MBLF, e u'_i é o eixo da i -ésima junta do MDE.

Figura 4: Parâmetros geométricos dos elos do MBLF e do MDE, respectivamente.

Fonte: Liang, Xu & Bergerman (1997).

A relação entre massas e momentos de inércia do MDE e do MBLF são apresentadas nas equações 2.2 e são condições necessárias para assegurar equivalência dinâmica entre ambos manipuladores:

$$\begin{aligned} m'_i &= \frac{M_t^2 m_i}{\sum_{k=1}^{i-1} m_k \sum_{k=1}^i m_k}, \\ I'_i &= I_i, \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde $i = 2, \dots, n$, e n é o número de juntas do MBLF.

As equivalências asseguradas pelas equações 2.1 e 2.2 resultam em energias cinéticas e rotacionais equivalentes para o MBLF e para o MDE (LIANG; XU; BERGERMAN, 1997). Consequentemente, torques aplicados nas juntas do MDE resultarão em deslocamentos iguais quando aplicados sobre as juntas do MBLF. Note ainda que a massa do primeiro membro do MDE não é definida e seu valor é escolhido arbitrariamente pelo projetista, bem como o membro a ser considerado como base do modelo equivalente.

2.3 Manipulador Sub-atuado

Como dito anteriormente, o MDE possui uma junta passiva fixada sobre o centro de massa do MBLF, ou seja, a modelagem resulta em um sistema equivalente sub-atuado.

Considere então a Equação 2.3 a seguir para um manipulador com $n = n_p + n_a$ juntas, das quais n_p são passivas e n_a são ativas e os subíndices a e p são relacionados às variáveis de juntas ativas e passivas respectivamente:

$$\begin{bmatrix} D_p & D_{pa} \\ D_{pa}^T & D_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_p \\ \ddot{q}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_p \\ V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_a \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

onde $q_p \in \mathbb{R}^{n_p \times 1}$ é o vetor com os ângulos das juntas passivas, $q_a \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ é o vetor com os ângulos das juntas ativas, $D_p \in \mathbb{R}^{n_p \times n_p}$, $D_{pa} \in \mathbb{R}^{n_p \times n_a}$ e $D_a \in \mathbb{R}^{n_a \times n_a}$ são matrizes de inércia, $V_p \in \mathbb{R}^{n_p \times 1}$ e $V_a \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ são forças centrífugas e de Coriolis e $\tau_a \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ são os torques aplicados nas juntas ativas.

Como esse sistema possui menos atuadores do que graus de liberdade, o controle é realizado sobre as juntas ativas e a variável que descreve o movimento da junta passiva é obtida a partir do acoplamento dinâmico existente entre elas (SIQUEIRA; TERRA; BERGERMAN, 2011). Resolvendo a primeira linha da Equação 2.3 para $\ddot{q}_p$ tem-se

$$\ddot{q}_p = D_p^{-1}(-D_{pa}\ddot{q}_a - V_p), \quad (2.4)$$

e substituindo na segunda linha da Equação 2.3 obtém-se

$$\tau_a = (D_a - D_{pa}^T D_p^{-1} D_{pa})\ddot{q}_a - D_{pa}^T D_p^{-1} V_p + V_a. \quad (2.5)$$

O controle é então realizado sobre as juntas ativas do MDE e, calculando-se τ_a a partir do controlador escolhido e substituindo na Equação 2.5, obtém-se as acelerações angulares $\ddot{q}_a$ das juntas ativas. Assim, substituindo-se $\ddot{q}_a$ na Equação 2.4 é possível obter as acelerações $\ddot{q}_p$ das juntas passivas.

3 MODELAGEM DO MANIPULADOR ESPACIAL DE BASE LIVRE FLUTUANTE COM DOIS BRAÇOS

Neste capítulo é apresentada a etapa de modelagem do MBLF com dois braços considerado neste trabalho e mostrado na Figura 5 (PAZELLI, 2011).

Figura 5: Manipulador de base livre flutuante com dois braços.

Fonte: Pazelli (2011).

O MBLF com dois braços é composto por quatro atuadores, dois efetuadores e uma base flutuante. Todos os membros do robô flutuam sobre uma mesa de ar de modo que seja emulada uma situação de microgravidade no plano 2D. O sistema é alimentado por baterias de lítio recarregáveis e troca informações com um computador remoto através de comunicação sem fio com dois módulos Xbee (um mestre no computador e um escravo no manipulador). A maior parte do processamento de dados é feita na própria placa eletrônica do robô, de modo que apenas os cálculos referentes aos controladores são realizados no computador. Este modo de operação foi escolhido porque o microcontrolador presente na placa eletrônica consegue processar dados mais rapidamente quando comparado ao software *Matlab*, usado no computador remoto para portar os controladores. A Tabela 1 apresenta os parâmetros estruturais do MBLF planar com dois braços a ser modelado.

3.1 Modelos Dinamicamente Equivalentes

Para modelar o MBLF mostrado na Figura 1, considerado neste trabalho, foi aplicado o método do Manipulador Dinamicamente Equivalente descrito no capítulo

Tabela 1: Parâmetros estruturais do manipulador de base livre com dois braços real.

Elo	m (kg)	I (kgm ²)	R (m)	L (m)
1	1.01	0.01	0.112	0.112
2	1.38	0.02	0.111	0.144
3	4.78	0.04	0.150	0.150
4	1.38	0.02	0.111	0.144
5	1.01	0.01	0.112	0.112

Fonte: Pazelli (2011).

anterior. Um MDE consegue mapear os movimentos de apenas um efetuador e, portanto, foram necessários dois MDEs para mapear os movimentos dos dois efetuadores do robô real (BEZERRA, 2015). Assim, como mapeiam o mesmo MBLF a etapa de modelagem resultará em simetrias entre os modelos equivalentes, o que será bastante útil para a etapa de controle. A Figura 6 apresenta o esquemático do MBLF com dois braços e os modelos dinamicamente equivalentes que o mapeiam. O efetuador do MDE1 é coincidente com o efetuador EF1 do MBLF, enquanto o efetuador do MDE2 é coincidente com EF2.

Figura 6: Manipulador de base flutuante com dois braços junto com os MDEs que mapearão os dois efetuadores.

Fonte: Bezerra (2015).

As figuras de 7 a 9 mostram os ângulos da convenção de Denavit-Hartenberg para os dois MDEs que mapeiam o MBLF considerado neste trabalho. Tanto para o MBLF como para os MDEs o sentido positivo de rotação adotado para os ângulos é o anti-horário.

As tabelas de 2 a 5 mostram as equivalências existentes entre o manipulador real e os MDEs, o que preserva a simetria da modelagem desenvolvida. As variáveis θ_i representam os ângulos das juntas do MBLF, θ'_i os ângulos do MDE1 e θ''_i os ângulos do MDE2.

Figura 7: Ângulos da convenção de Denavit-Hartenberg medidos no MBLF.

Fonte: Bezerra (2015).

Figura 8: Ângulos da convenção de Denavit-Hartenberg para o MDE1.

Fonte: Bezerra (2015).

Figura 9: Ângulos da convenção de Denavit-Hartenberg para o MDE2.

Fonte: Bezerra (2015).

Tabela 2: Equivalências entre elos do manipulador de base livre real e dos MDEs

MBLF	MDE1	MDE2
elo 1	elo 5	elo 1
elo 2	elo 4	elo 2
elo 3	elo 3	elo 3
elo 4	elo 2	elo 4
elo 5	elo 1	elo 5

Fonte: Bezerra (2015).

Tabela 3: Equivalências entre juntas do manipulador de base livre real e dos MDEs

MBLF	MDE1	MDE2
J2	J5'	J2''
J3	J4'	J3''
J4	J3'	J4''
J5	J2'	J5''

Fonte: Bezerra (2015).

Tabela 4: Equivalências entre ângulos das juntas do manipulador de base livre real e dos MDEs

MBLF	MDE1	MDE2
θ_2	$-\theta'_5$	θ''_2
θ_3	$-\theta'_4$	θ''_3
θ_4	$-\theta'_3$	θ''_4
θ_5	$-\theta'_2$	θ''_5

Fonte: Bezerra (2015).

Tabela 5: Equivalências entre torques nas juntas do manipulador de base livre real e dos MDEs

MBLF	MDE1	MDE2
τ_2	$-\tau'_5$	τ''_2
τ_3	$-\tau'_4$	τ''_3
τ_4	$-\tau'_3$	τ''_4
τ_5	$-\tau'_2$	τ''_5

Fonte: elaborada pelo autor.

A partir dos valores apresentados na Tabela 1 e com as equações 2.1 e 2.2 foram calculados os parâmetros geométricos e dinâmicos dos dois manipuladores dinamicamente equivalentes que fazem o mapeamento dos efetuadores. Os valores são mostrados nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Parâmetros estruturais calculados para o MDE1

Elo	m (kg)	I (kgm ²)	W (m)	lc (m)
1	1.0100	0.0100	0.0118	0
2	52.2487	0.0200	0.0430	0.0152
3	25.4933	0.0400	0.1500	0.0375
4	2.0574	0.0200	0.2120	0.0833
5	1.1293	0.0100	0.2122	0.1002

Fonte: Bezerra (2015).

Tabela 7: Parâmetros estruturais calculados para o MDE2

Elo	m (kg)	I (kgm ²)	W (m)	lc (m)
1	1.0100	0.0100	0.0118	0
2	52.2487	0.0200	0.0430	0.0152
3	25.4933	0.0400	0.1500	0.0375
4	2.0574	0.0200	0.2120	0.0833
5	1.1293	0.0100	0.2122	0.1002

Fonte: Bezerra (2015).

Os parâmetros estruturais calculados para os modelos equivalentes foram utilizados em simulações numéricas feitas no Matlab com os controladores considerados neste trabalho. As equações 3.1 e 3.2 a seguir apresentam as relações entre as juntas passivas e entre os torques dos modelos equivalentes, respectivamente:

$$\theta'_1 = -\pi + \sum_{i=1}^5 \theta''_i, \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \tau'_2 \\ \tau'_3 \\ \tau'_4 \\ \tau'_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau''_2 \\ \tau''_3 \\ \tau''_4 \\ \tau''_5 \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

E ainda, como a primeira junta de cada MDE é passiva tem-se $\tau'_1 = \tau''_1 = 0$.

3.2 Jacobiano Generalizado

O conceito de Jacobiano Generalizado foi proposto por Yoshida (1997) e relaciona as velocidades do efetuador com as velocidades das juntas ativas de modo que seja eliminada

a dependência em relação a variáveis das juntas passivas do manipulador. Tal método foi utilizado em trabalhos relacionados a robôs sub-atuados como em Zhang et al. (2014) e Chacin, Mora & Yoshida (2009). Considerando um manipulador com n_p juntas passivas e n_a ativas, a Equação 2.3 pode ser reescrita acrescentando-se forças externas como

$$\begin{bmatrix} D_p & D_{pa} \\ D_{pa}^T & D_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_p \\ \ddot{q}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_p \\ V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \tau_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_p^T \\ J_a^T \end{bmatrix} F_{ext}, \quad (3.3)$$

onde $J_p \in \mathbb{R}^{6 \times n_p}$ é a matriz jacobiana relacionada às juntas passivas, $J_a \in \mathbb{R}^{6 \times n_a}$ é a matriz jacobiana relacionada às juntas ativas, $\mathbf{0} \in \mathbb{R}^{n_p \times 1}$ é um vetor nulo referente aos torques das juntas passivas, e $F_{ext} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ são forças e torques externos atuando sobre o efetuador.

As velocidades angular e linear do efetuador, denotadas por $\dot{\chi} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, associam-se com as velocidades das juntas por

$$\dot{\chi} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} = J_a \dot{q}_a + J_p \dot{q}_p, \quad (3.4)$$

onde v_x, v_y e v_z denotam as velocidades lineares ao longo dos eixos x, y e z respectivamente, e $\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y$ e $\dot{\theta}_z$ denotam as velocidades angulares em torno dos eixos x, y e z respectivamente.

Considerando um intervalo de tempo suficientemente pequeno no qual D_p, D_{pa} e V_p possam ser consideradas constantes e integrando-se a primeira linha da Equação 3.4, o momento total $\mathcal{L}$ do sistema é obtido:

$$\mathcal{L} = \int J_p^T F_{ext} dt = D_p \dot{q}_p + D_{pa} \dot{q}_a. \quad (3.5)$$

Combinando as equações 3.4 e 3.5 é possível eliminar as variáveis associadas às juntas passivas como

$$\dot{\chi} = \hat{J} \dot{q}_a + \dot{\chi}_0, \quad (3.6)$$

com

$$\dot{\chi}_0 = J_p D_p^{-1} \mathcal{L}, \quad (3.7)$$

e

$$\hat{J} = J_a - J_p D_p^{-1} D_{pa}, \quad (3.8)$$

onde $\hat{J} \in \mathbb{R}^{6 \times n_a}$ é o Jacobiano Generalizado (YOSHIDA, 1997).

Neste trabalho foi imposta a condição de que inicialmente o momento total do sistema é nulo, de modo que $\dot{\chi}_0 = 0$. Assim, para o MBLF planar com dois braços e os dois

MDEs que o modelam, as velocidades dos efetuadores se relacionam com as velocidades das juntas ativas dos MDEs por

$$\dot{\chi}_{EFi} = \hat{J}_{MDEi} \dot{q}_{a_{MDEi}}, \quad (3.9)$$

onde $\dot{\chi}_{EFi} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ é o vetor com as velocidades lineares e angulares do efetuator EFi e $\hat{J}_{MDEi} \in \mathbb{R}^{6 \times n_a}$ é o jacobiano generalizado de MDEi.

Segundo Bezerra (2015), as simetrias resultantes da modelagem permitem reunir ambos jacobianos generalizados em uma única equação. Para tanto, são consideradas apenas as linhas referentes às velocidades angulares das juntas dos MDE em $\hat{J}_{MDE1}$ e $\hat{J}_{MDE2}$ de modo que $\hat{J}_{MDE1}, \hat{J}_{MDE2} \in \mathbb{R}^{2 \times n_a}$. Assim, as velocidades dos dois efetuadores e as velocidades das juntas ativas $\dot{q}_{a_{MDE2}}$ do MDE2 se relacionem por

$$\dot{q}_{a_{MDE2}} = \begin{bmatrix} T \\ \hat{J}_{MDE2} \end{bmatrix}^{-1} \dot{\chi}_{EF1,EF2}, \quad (3.10)$$

onde $\dot{q}_{a_{MDE2}} \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ são as velocidades angulares das juntas do MDE2, $T \in \mathbb{R}^{2 \times n_a}$ tal que

$$T = -\hat{J}_{MDE1} \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

e

$$\dot{\chi}_{EF1,EF2} = \begin{bmatrix} v_{EF1x} \\ v_{EF1y} \\ v_{EF2x} \\ v_{EF2y} \end{bmatrix}.$$

O sistema de controle atua então sobre os atuadores do MDE2 e, pelas simetrias apresentadas nas tabelas de 2 a 5, são obtidas as variáveis e os torques para o MDE1.

4 SISTEMAS DE CONTROLE

Neste capítulo são apresentados os controladores aplicados no manipulador espacial de base livre flutuante com dois braços para simulação numéricas em Matlab. As trajetórias de referência são definidas no espaço de trabalho do MBLF e, através da Equação 3.10, seus pontos são mapeados no espaço das juntas onde é realizada a tarefa de controle de seguimento de trajetória. A Figura 10 apresenta a estrutura do sistema de controle de seguimento de trajetória proposta para os manipuladores dinamicamente equivalentes.

Figura 10: Diagrama de blocos da estrutura de controle proposta para os manipuladores dinamicamente equivalentes.

Fonte: elaborada pelo autor.

O bloco *Comutador* utiliza a Equação 3.2 para transformar os torques $\tau'' = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5]^T$ do MDE2 em $\tau' = [-\tau_5 \ -\tau_4 \ -\tau_3 \ -\tau_2 \ -\tau_1]^T$, que são os torques das juntas do MDE1.

4.1 Formulação do problema

O problema de controle considerado neste trabalho consiste em fazer com que ambos efetuidores do MBLF sigam trajetórias definidas no espaço de trabalho com erros suficientemente pequenos. O manipulador possui quatro juntas, ou seja, cada MDE terá $n = 5$ juntas das quais $n_a = 4$ são ativas e $n_p = 1$ é passiva. Como o controle é feito sobre as juntas ativas do MDE, o estado do sistema é definido então como os erros de

acompanhamento das juntas ativas:

$$x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_a^d - q_a \\ \dot{q}_a^d - \dot{q}_a \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

onde $x \in \mathbb{R}^{2n_a \times 1}$ é o estado do sistema, $e \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ é o erro de seguimento de trajetória, $\dot{e} \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ é o erro de seguimento de velocidade, $q_a^d \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ é o vetor com as trajetórias desejadas para as juntas ativas, e $q_a \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ é o vetor com os ângulos das juntas ativas do MDE.

E ainda

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_a^d - \dot{q}_a \\ \ddot{q}_a^d - \ddot{q}_a \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Considerando apenas as juntas ativas e acrescentando o sinal de distúrbio $\tau_{dist_a} \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$, a Equação 2.3 pode ser reescrita como

$$D_{aa}(q)\ddot{q}_a + V_a(q, \dot{q}) + \tau_{dist_a} = \tau_a, \quad (4.3)$$

onde $q = \begin{bmatrix} q_p & q_a \end{bmatrix}^T$.

Resolvendo 4.3 para $\ddot{q}$ e substituindo na segunda linha de 4.2 tem-se

$$\ddot{e} = \ddot{q}_a^d + D_{aa}(q)^{-1}(V_a(q, \dot{q}) - \tau_a) + D_{aa}(q)^{-1}\tau_{dist_a}. \quad (4.4)$$

Os sinais de controle e distúrbio, u e w respectivamente, são definidos segundo Lewis, Dawson & Abdallah (2004) por

$$u = \ddot{q}_a^d + D_{aa}(q)^{-1}(V_a(q, \dot{q}) - \tau_a), \quad (4.5)$$

$$w = D_{aa}(q)^{-1}\tau_{dist_a}, \quad (4.6)$$

sendo $\ddot{e} = u + w$.

Invertendo a Equação 4.5 são obtidos os torques das juntas ativas do MDE a partir da entrada de controle u :

$$\tau_a = D_{aa}(\ddot{q}_a^d - u) + V_a(q, \dot{q}), \quad (4.7)$$

onde u é dada pela estratégia de controle selecionada para alcançar a estabilidade do sistema.

Assim, o vetor de torques a serem aplicados nas n juntas do MDE será dado por $\tau = \begin{bmatrix} \tau_{dist_p} & \tau_a + \tau_{dist_a} \end{bmatrix}$, onde τ_{dist_p} é o distúrbio aplicado sobre a junta passiva. Reescrevendo a equação dinâmica para o MDE agrupando os termos referentes às juntas passiva e ativas tem-se:

$$D(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) = \tau, \quad (4.8)$$

onde $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $V(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ e $\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$.

Calculados os torques com o controlador escolhido, é possível isolar $\ddot{q}$ na Equação 4.8 para se obter a aceleração das juntas. Integrando-se então uma e duas vezes $\ddot{q}$ são determinadas as velocidades e posições angulares das n juntas do MDE, respectivamente.

Em aplicações práticas o sistema opera em um ambiente de temperaturas extremas, vácuo e radiação elevada. Portanto, o manipulador espacial está sujeito a distúrbios, incertezas paramétricas e de dinâmicas não modeladas que podem degradar a performance do controlador. Para lidar com este problema foram aplicados os controladores robustos e adaptativo descritos nas seções seguintes e seus desempenhos foram avaliadas por comparação de índices de desempenho.

4.2 Regulador Recursivo Robusto

Terra, Cerri & Ishihara (2014) propuseram um Regulador Linear Quadrático Recursivo Robusto (RLQR) para a seguinte classe de sistemas no tempo discreto sujeitos a incertezas paramétricas:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= (F_i + \delta F_i)x_i + (G_i + \delta G_i)u_i, \\ x_0 &= \text{constante}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

onde $i = 0, \dots, N$, $x_i \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados, $u \in \mathbb{R}^m$ é a entrada de controle, $F_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e $G_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ matrizes conhecidas do modelo, δF_i e δG_i representam incertezas paramétricas.

As matrizes de incertezas são definidas como

$$\begin{bmatrix} \delta F_i & \delta G_i \end{bmatrix} = H_i \Delta_i \begin{bmatrix} E_{F_i} & E_{G_i} \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

onde $i = 0, \dots, N$, $H_i \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $E_{F_i} \in \mathbb{R}^{l \times n}$ e $E_{G_i} \in \mathbb{R}^{l \times m}$ são matrizes conhecidas e $\Delta_i \in \mathbb{R}^{p \times l}$ é uma matriz arbitrária tal que $\|\Delta_i\| \leq 1$.

O objetivo é então encontrar uma matriz K de realimentação tal que a entrada de controle $u = Kx$ leve o sistema de volta para o estado $x = 0$. Para tanto é necessário resolver o seguinte problema de otimização (TERRA; CERRI; ISHIHARA, 2014):

$$\min_{x_{i+1}, u_i} \max_{\delta F_i, \delta G_i} \bar{J}_i^\mu(x_{i+1}, u_i, \delta F_i, \delta G_i), \quad (4.11)$$

onde $\bar{J}_i^\mu$ é a função de custo

$$\begin{aligned} \bar{J}_i^\mu(x_{i+1}, u_i, \delta F_i, \delta G_i) = \\ \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_{i+1}^r & 0 \\ 0 & R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} + \Phi^T \begin{bmatrix} Q_i & 0 \\ 0 & \mu I \end{bmatrix} \Phi, \end{aligned} \quad (4.12)$$

com $\mu \in \mathfrak{R}$ tal que $\mu > 0$ é um parâmetro de penalidade que reflete os níveis de robustez e otimalidade e garante a regularização do RLQR, $Q_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ tal que $Q_i \succ 0$, $R_i \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ tal que $R_i \succ 0$ fixos, $P_{i+1}^r \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ e

$$\Phi = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I & -G_i - \delta G_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ u_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -I \\ F_i + \delta F_i \end{bmatrix} x_i \right\}.$$

Considerando Q uma matriz de ponderação diagonal, quanto maior for o elemento de sua diagonal principal, maior prioridade terá a variável de estado a ele associada. Ou seja, quanto maior for o elemento da diagonal de Q , mais minimizada será a variável de estado a ele associada durante a operação do sistema com o RLQR. Caso a matriz de ponderação R também seja escolhida diagonal, quanto maior for o elemento de sua diagonal principal, mais minimizada será a entrada de controle a ele associada durante a operação do sistema com o RLQR. Ambas as matrizes de ponderação são definidas e ajustadas pelo projetista baseando-se nos objetivos de controle e P_i pode ser inicializada como uma matriz identidade.

A solução para o problema de otimização (4.11), (4.12) é então dada por (TERRA; CERRI; ISHIHARA, 2014)

$$\begin{bmatrix} x_{i+1}^* \\ u_i^* \\ \bar{J}^\mu(x_{i+1}^*, u_i^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & x_i^{*T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_i \\ K_i \\ P_i \end{bmatrix} x_i^*, \quad i = 0, \dots, N, \quad (4.13)$$

onde N é um horizonte finito, $L_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ e $K_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ são obtidos pela recursão

$$\begin{bmatrix} L_i \\ K_i \\ P_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & \mathcal{F}_i^T \\ I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}^T \Psi^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -I \\ \mathcal{F}_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

com

$$\Psi = \begin{bmatrix} P_{i+1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & R_i^{-1} & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & Q_i^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Sigma_i(\mu, \hat{\lambda}_i) & \mathcal{I} & -\mathcal{G}_i \\ I & 0 & 0 & \mathcal{I}^T & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & -\mathcal{G}_i^T & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_i = \begin{bmatrix} \mu^{-1}I - \hat{\lambda}_i^{-1}H_iH_i^T & 0 \\ 0 & \hat{\lambda}_i^{-1}I \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{I} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \mathcal{G}_i = \begin{bmatrix} G_i \\ E_{G_i} \end{bmatrix}, \mathcal{F}_i = \begin{bmatrix} F_i \\ E_{F_i} \end{bmatrix}.$$

Pode-se escrever ainda:

$$P_i = L_i^T P_{i+1} L_i + K_i^T R_i K_i + Q_i + \quad (4.15)$$

$$(\mathcal{I}L_i - \mathcal{G}_i K_i - \mathcal{F}_i)^T \Sigma(\mu, \lambda_i)^{-1} (\mathcal{I}L_i - \mathcal{G}_i K_i - \mathcal{F}_i) \succ 0.$$

O método de função de penalidade impõe que $\mu \rightarrow +\infty$ (TERRA; CERRI; ISHIHARA, 2014), de modo que

$$\lim_{\mu \rightarrow +\infty} \Sigma(\mu, \lambda_i) = 0,$$

consequentemente

$$(\mathcal{I}L_i - \mathcal{G}_i K_i - \mathcal{F}_i)^T \Sigma(\mu, \lambda_i)^{-1} (\mathcal{I}L_i - \mathcal{G}_i K_i - \mathcal{F}_i) = 0,$$

e

$$P_i = L_i^T P_{i+1} L_i + K_i^T R_i K_i + Q_i.$$

A cada iteração a matriz P_i é finita com $\mathcal{I}L_i - \mathcal{G}_i K_i - \mathcal{F}_i \rightarrow 0$ (TERRA; CERRI; ISHIHARA, 2014) tal que

$$L_i = F_i + G_i K_i, \quad (4.16)$$

$$E_{F_i} + E_{G_i} K_i = 0.$$

Ou seja, fazendo $\mu \rightarrow +\infty$ os efeitos das incertezas paramétricas são minimizados e a robustez do controlador é garantida, uma vez que a planta incerta se aproxima da planta nominal conforme mostrado na Equação 4.16.

Análises de estabilidade e convergência são encontradas em Terra, Cerri & Ishihara (2014).

4.3 Adaptativo com Modos Deslizantes

Sistemas de controle com modos deslizantes são projetados para levar as variáveis de estado do sistema para uma superfície no espaço de estados (superfície deslizante) e, uma vez que tal superfície é atingida, as variáveis são mantidas em sua vizinhança. Controladores por modos deslizantes foram empregados com sucesso em manipuladores para realizar a tarefa seguimento de trajetórias considerando incertezas paramétricas e distúrbios atuando sobre o robô (WAN et al., 2016), (OUYANG; TANG; YUE, 2016), (NAGHIBI; PIRMOHAMADI;

MOOSAVIAN, 2016), (LI; CHU, 2014). Seguindo esta linha, um controlador proporcional-integral-derivativo adaptativo combinado com modos deslizantes foi aplicado no modelo dinamicamente equivalente do MBLF considerado neste trabalho. A partir do erro de seguimento de trajetória definido em 4.1, a superfície deslizante s é definida como:

$$s = \dot{e} + \lambda e, \quad (4.17)$$

onde $\lambda \in \Re$ tal que $\lambda > 0$ é a constante de deslizamento em Hz .

As referências são definidas a partir da superfície deslizante e das trajetórias mapeadas para o espaço das juntas pelo conceito do Jacobiano Generalizado, como mostrado nas equações 4.18:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{ref} &= \dot{q}_a^d + \lambda e, \\ \ddot{q}_{ref} &= \ddot{q}_a^d + \lambda \dot{e} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Baseando-se nas equações 4.3 e 4.18, o torque de referência para as juntas ativas é então definido por

$$\tau_r = D(q)(\ddot{q}_d + \lambda \dot{e}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda e) + Y(t, q, \dot{q}), \quad (4.19)$$

onde $Y(t, q, \dot{q})$ representa os termos de distúrbios e incertezas.

A lei de controle adaptativo com modos deslizantes é definida com base na estimativa dos torques de referência τ_r das juntas ativas e nos ganhos de um controlador PID para a obtenção dos torques a serem aplicados nessas juntas:

$$\tau_a = \hat{\tau}_r + K_P e + K_I \int e dt + K_D \dot{e} + \eta \text{sign}(s), \quad (4.20)$$

onde $\text{sign}(s)$ é a função sinal, $K_P \in \Re^{n_a \times n_a}$, $K_I \in \Re^{n_a \times n_a}$ e $K_D \in \Re^{n_a \times n_a}$ são matrizes de ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente, $\eta > 0 \in \Re^{n \times n}$ é a matriz de ganho do controle por modos deslizantes, e $\hat{\tau}_r \in \Re^{n_a \times 1}$ é a estimativa dos torques de referência τ_r que será atualizado pela lei adaptativa

$$\hat{\tau}_r = \sigma s, \quad \hat{\tau}_r(0) = \hat{\tau}_{r0}, \quad (4.21)$$

onde $\sigma > 0$ é a constante de ganho adaptativo e $\hat{\tau}_{r0}$ é o vetor que contém os valores iniciais de torques estimados para as juntas.

Observando a Equação 4.20 vê-se que a lei de controle é um controlador por realimentação que envolve apenas os erros de seguimento de trajetória e de velocidade, sem a necessidade de se conhecer a priori a dinâmica do robô a ser controlado.

4.4 H-infinito Robusto

Tomando ainda o cenário no qual há sinais de distúrbio agindo sobre as juntas e incertezas multiplicativas não estruturadas na entrada do sistema, emprega-se o controlador

H-infinito Robusto linear combinado com a formulação descrita na seção 4.1. Então, considere novamente a equação dinâmica 4.3 para o manipulador robótico:

$$D_{aa}(q)\ddot{q}_a + V_a(q, \dot{q}) + \tau_{dist_a} = \tau_a,$$

Tal equação pode ser redefinida de modo que o torque seja uma função da estimativa da matriz de inércia e torques não inerciais (SIQUEIRA; TERRA; BERGERMAN, 2011):

$$\hat{D}_{aa}(q)\psi + \hat{V}_a(q, \dot{q}) = \tau_a, \quad (4.22)$$

onde $\hat{D}_{aa}(q) \in \mathbb{R}^{n_a \times n_a}$ é a estimativa da matriz de inércia $D_{aa}(q)$, $\hat{V}_a(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n_a \times 1}$ é a estimativa dos torques não inerciais $V_a(q, \dot{q})$ e ψ é definido por:

$$\psi = K_P(q_d - q) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + \ddot{q}_a^d. \quad (4.23)$$

Para tratar das incertezas multiplicativas não estruturadas e dos distúrbios, a Equação 4.7 é combinada com o controlador H-infinito $K(s)$ no domínio da frequência. Para obter tal controlador devem ser ajustadas inicialmente as matrizes de ponderação $W_e \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e $W_\Delta \in \mathbb{R}^{n \times n}$:

$$W_e(s) = \begin{bmatrix} W_{e,1}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_{e,2}(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & W_{e,n}(s) \end{bmatrix}, \quad (4.24)$$

$$W_{e,i}(s) = \frac{s + \omega_b}{M_s(s + \omega_b\epsilon)},$$

onde $i = 1, \dots, n$, n é o número de juntas, ω_b é a largura de banda, M_s é o pico máximo e $\epsilon > 0$.

$$W_\Delta(s) = \begin{bmatrix} W_{\Delta,1}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_{\Delta,2}(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & W_{\Delta,n}(s) \end{bmatrix}, \quad (4.25)$$

$$W_{\Delta,i}(s) = \frac{s + \omega_{bc}}{M_u(\epsilon s + \omega_{bc})},$$

onde $i = 1, \dots, n$, n é o número de juntas, ω_b é a largura de banda do controlador, M_u é o ganho máximo e $\epsilon > 0$.

A matriz de ponderação W_e modela o desempenho do sistema no domínio da frequência baseando-se na função de sensibilidade $S(s) = [I + P(s)K(s)]^{-1}$, que é a função de transferência entre a saída do sistema e a entrada de distúrbio. Já a matriz de

ponderação W_Δ modela incertezas multiplicativas não estruturadas na entrada do sistema. Assim, os parâmetros de tais matrizes devem ser escolhidos de modo que elas satisfaçam as condições seguintes (SIQUEIRA; TERRA; BERGERMAN, 2011):

$$\begin{aligned} \|S(s)\|_\infty &\leq \|W_e^{-1}\|_\infty, \\ \|T(s)\|_\infty &\leq \|W_\Delta^{-1}\|_\infty, \end{aligned} \quad (4.26)$$

onde $T(s) = I - S(s)$ é a função de sensibilidade complementar.

A Figura 11 mostra o diagrama do sistema com as matrizes de ponderação, entrada de distúrbio e controlador H-infinito K_∞ tal que $u = K_\infty e$.

Figura 11: Diagrama de blocos do sistema de controle.

Fonte: Siqueira, Terra & Bergerman (2011).

O objetivo do controle H-infinito é então garantir que a função de transferência T_{ew} entre o erro e e a entrada de distúrbio w seja limitada por um nível de atenuação γ . Ou seja, o objetivo do controlador é fazer com que

$$\|T_{ew}\|_\infty < \gamma \quad (4.27)$$

Os procedimentos para obtenção do controlador foram feitos no *Matlab* com o auxílio das funções *sysic* e *hinfsyn*, que utiliza como parâmetros W_e , W_Δ , K_P , K_D e γ para retornar K_∞ .

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos de aplicações dos controladores do capítulo anterior sobre o manipulador planar de base livre flutuante com dois braços. Para cada efetuador foi definida uma trajetória no espaço de trabalho e, através do Jacobiano Generalizado, os pontos foram mapeados no espaço das juntas. Para o efetuador EF1 foi escolhida uma trajetória retilínea definida por:

$$\begin{aligned} x_d(t) &= a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5, \\ y_d(t) &= y_0 + (x_d(t) - x_0) \frac{y_f - y_0}{x_f - x_0}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

onde os coeficientes a_i são obtidos a partir das condições $x_d(t_0)$, $\dot{x}_d(t_0)$, $\ddot{x}_d(t_0)$, $x_d(t_f)$, $\dot{x}_d(t_f)$ e $\ddot{x}_d(t_f)$, $y_d(t_0)$, $\dot{y}_d(t_0)$, $\ddot{y}_d(t_0)$, $y_d(t_f)$, $\dot{y}_d(t_f)$ e $\ddot{y}_d(t_f)$ nos instantes inicial e final $t = t_0$ e $t = t_f$, respectivamente.

Para o efetuador EF2 foi escolhida uma curva quártupla definida por:

$$\begin{aligned} x_d(t) &= a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5, \\ y_d(t) &= b_0 + b_1x_d + b_2x_d^2 + b_3x_d^3 + b_4x_d^4 + b_5x_d^5, \end{aligned} \quad (5.2)$$

onde os coeficientes a_i e b_i podem ser encontrados de maneira análoga aos coeficientes da trajetória retilínea.

As posições inicial e final escolhidas são, respectivamente, $(x_{0_{EF1}}, y_{0_{EF1}}, x_{0_{EF2}}, y_{0_{EF2}}) = (-0.61, -0.11, 0.61, 0, 14)m$ e $(x_{f_{EF1}}, y_{f_{EF1}}, x_{f_{EF2}}, y_{f_{EF2}}) = (-0.40, 0, 0.40, 0, 30)m$. Velocidades e acelerações são nulas no início e no final das trajetórias. Tais condições resultarão no movimento desejado para os efetuadores EF1 e EF2 mostrado na Figura 12.

Além disso, os efetuadores devem ir da posição inicial para a final em 5 segundos e, dentro deste período, torques de distúrbio apresentados na Equação 5.3 e na Figura 13 foram aplicados nas juntas do manipulador (SIQUEIRA; TERRA; BERGERMAN, 2011). As amplitudes destes torques foram escolhidas de modo que fossem próximas às amplitudes dos torques resultantes do caso nominal, representando assim um cenário de operação bastante hostil uma vez que o sistema espacial está sujeito a temperaturas extremas, radiação e outros fatores adversos.

$$\tau_{d_i} = Ae^{\frac{(t-t_{med})^2}{2\sigma^2}} \text{sen}(2\pi ft), \quad (5.3)$$

onde $A = [0.001 \ 0.08 \ 0.08 \ 0.1 \ 0.1]N.m$ são as amplitudes máximas do distúrbio em cada junta, t é o tempo de simulação, $t_{med} = 2.5s$ é o tempo médio, $\sigma = 2.5$ é a variância e $f = 2Hz$ é a frequência natural do sinal de distúrbio.

Figura 12: Movimentação desejada para os efetadores EF1 e EF2.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 13: Torques de distúrbio a serem aplicados nas juntas do MDE.

Fonte: elaborada pelo autor.

Nas seções seguintes são apresentados os resultados para os casos nominais e com distúrbios e incertezas. Para evitar redundância de figuras são mostrados apenas os gráficos referentes ao MDE2, uma vez que os resultados para o MDE1 são obtidos através das simetrias apresentadas nas tabelas 4 e 5. Os sistemas foram simulados em Matlab com um tempo amostral de 10^{-4} segundos e utilizando a função *c2d*, de modo que a amostragem não interferisse significativamente nos erros de acompanhamento e ao mesmo tempo não resultasse em um tempo elevado de simulação.

5.1 Regulador Recursivo Robusto

As matrizes de ponderação Q e R foram definidas de modo que os autovalores de $F - GK$ estivessem todos localizados dentro do círculo unitário e que a resposta do sistema fosse suficientemente rápida. Dessa forma, o controlador garante estabilidade e faz com que os elementos de $x = [e \ \dot{e}]^T$ se aproximem de zero mais rapidamente.

Os parâmetros e matrizes de ponderação escolhidos para a simulação numérica com o RLQR foram $\mu = 10^{15}$, $H_i = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n]^T$, com $h_i \in [-0.3, 0.3]$, $E_F = f_{ii}$, $E_G = g_{ii}$, $n = 1, \dots, 10$, $\Delta = 1.0$, $Q = \text{diag}(80000, 70000, 70000, 11000, 11000, 11000, 100, 100, 3000, 2000)$ e $R = \text{diag}(0.01, 0.005, 0.05, 0.0001, 0.0001, 0.01, 0.005, 0.05, 0.0001, 0.0001)$, de modo que os elementos das matrizes do modelo em espaço de estados fossem modificados em até 30% a partir do valor nominal para representar incertezas paramétricas e de dinâmicas não modeladas. Figuras de 14 a 19 e Tabela 8 mostram os resultados obtidos com o RLQR para o MDE2.

Tabela 8: Erros máximos absolutos obtidos com o Regulador Recursivo Robusto.

Variáveis	Nominal	Com distúrbios e incertezas
x	$1.58 \times 10^{-4} \text{ m}$	$6.94 \times 10^{-6} \text{ m}$
y	$8.88 \times 10^{-5} \text{ m}$	$1.09 \times 10^{-6} \text{ m}$
J_2 do MBLF	0.0014 rad	$2.09 \times 10^{-6} \text{ rad}$
J_3 do MBLF	$6.90 \times 10^{-4} \text{ rad}$	$5.07 \times 10^{-6} \text{ rad}$
J_4 do MBLF	$3.04 \times 10^{-4} \text{ rad}$	$2.12 \times 10^{-5} \text{ rad}$
J_5 do MBLF	$2.46 \times 10^{-4} \text{ rad}$	$8.21 \times 10^{-6} \text{ rad}$

Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados mostram que o RLQR apresentou desempenho satisfatório uma vez que a referência foi seguida com erros bastante pequenos tanto no espaço das juntas como no espaço de trabalho do manipulador.

5.2 Adaptativo com Modos Deslizantes

Sistemas de controle por modos deslizantes podem causar chaveamentos de torques nos atuadores, e para evitar este problema a Equação 4.20 foi modificada da seguinte

Figura 14: Trajetória das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 15: Torques aplicados nas juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 16: Velocidade angular das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 17: Trajetória das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 18: Torques aplicados nas juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 19: Velocidade angular das juntas com o Regulador Recursivo Robusto. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

forma (OUYANG; TANG; YUE, 2016):

$$\tau = \hat{\tau}_r + K_P e + K_I \int e dt + K_D \dot{e} + \eta \text{sat}(s/\phi), \quad (5.4)$$

com

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} \text{sign}(s/\phi), & |s/\phi| > 1, \\ s/\phi, & |s/\phi| \leq 1, \end{cases} \quad (5.5)$$

onde ϕ é uma constante que determina a largura da fronteira da superfície deslizante.

Os valores de λ , σ , ϕ , η , K_P , K_I e K_D foram escolhidos de modo que não houvesse chaveamento dos torques aplicados nas juntas dos MDEs e visando garantir erro de seguimento de trajetória suficientemente pequeno. Notou-se também que, mesmo com a substituição da função sinal por $\text{sat}(s/\phi)$, ainda poderia ocorrer chaveamento de torques caso fossem aplicados valores demasiadamente altos de η , K_P , K_I e K_D , o que representou um fator adicional a ser considerado durante a escolha de tais matrizes.

$$\begin{array}{llll} \lambda = 22 & \sigma = 8 & \phi = 0.2 & \\ \eta = 10I & K_P = 200I & K_I = 100I & K_D = 50I \end{array}$$

Figuras de 20 a 25 e Tabela 9 mostram os resultados obtidos com o controlador por modos deslizantes para o MDE2.

Tabela 9: Erros máximos absolutos obtidos com o controle por modos deslizantes.

Variáveis	Nominal	Com distúrbios e incertezas
x	$7.03 \times 10^{-4} \text{ m}$	$4.87 \times 10^{-6} \text{ m}$
y	$8.80 \times 10^{-6} \text{ m}$	$9.66 \times 10^{-6} \text{ m}$
J_2 do MBLF	$1.90 \times 10^{-5} \text{ rad}$	$2.72 \times 10^{-6} \text{ rad}$
J_3 do MBLF	$2.52 \times 10^{-5} \text{ rad}$	$1.45 \times 10^{-5} \text{ rad}$
J_4 do MBLF	$5.80 \times 10^{-5} \text{ rad}$	$2.49 \times 10^{-5} \text{ rad}$
J_5 do MBLF	$4.32 \times 10^{-5} \text{ rad}$	$7.95 \times 10^{-6} \text{ rad}$

Fonte: elaborada pelo autor.

Os valores mostrados nas figuras de 23 a 25 e na Tabela 9 indicam que a performance do controle por modos deslizantes aplicado ao MBLF foi aceitável uma vez que os efetadores seguiram as trajetórias definidas com erros suficientemente pequenos.

5.3 H-infinito Robusto

Para o controlador H-infinito, combinado com um controle PD, os parâmetros foram adotados de modo que as condições apresentadas na Equação 4.26 fossem satisfeitas:

Figura 20: Trajetória das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 21: Torques aplicados nas juntas com o controle por modos deslizantes. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 22: Velocidade angular das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 23: Trajetória das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 24: Torques aplicados nas juntas com o controle por modos deslizantes. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 25: Velocidade angular das juntas com o controle por modos deslizantes. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

$K_P = 300$, $K_D = 100$, $M_s = 10$, $\omega_b = 10^{-5} \text{ rad/s}$, $\epsilon = 0.0001$, $M_u = 150$ e $\omega_{bc} = 10^6 \text{ rad/s}$. As figuras 26 e 27 mostram os valores singulares relacionados às condições impostas para W_e e W_Δ . A escolha dos valores de M_s e M_u faz variar diretamente a amplitude desses valores singulares e portanto altera diretamente a robustez do controlador. Assim, valores muito elevados de M_s e M_u podem resultar em um controlador pouco robusto perante incertezas e distúrbios aos quais o sistema está sujeito.

Figura 26: Valores singulares para W_e^{-1} e $S(s)$.

Fonte: elaborada pelo autor.

Para representar incertezas paramétricas, massas e momentos de inércia do manipulador foram modificados em até 30% do valor nominal. Figuras de 31 a 30 e Tabela 10 mostram os resultados obtidos com o controlador H-infinito.

Tabela 10: Erros máximos absolutos obtidos com o controlador H-infinito.

Variáveis	Nominal	Com distúrbios e incertezas
x	0.0013 m	$9.02 \times 10^{-6} \text{ m}$
y	0.0023 m	$1.17 \times 10^{-5} \text{ m}$
J_2 do MBLF	0.0011 rad	$1.28 \times 10^{-5} \text{ rad}$
J_3 do MBLF	$1.81 \times 10^{-4} \text{ rad}$	$1.71 \times 10^{-5} \text{ rad}$
J_4 do MBLF	$8.81 \times 10^{-5} \text{ rad}$	$2.71 \times 10^{-5} \text{ rad}$
J_5 do MBLF	0.0014 rad	$1.03 \times 10^{-5} \text{ rad}$

Fonte: elaborada pelo autor.

Vê-se que embora as trajetórias desejadas para EF1 e EF2 tenham sido seguidas, o

Figura 27: Valores singulares para W_{Δ}^{-1} e $T(s) = K_{\infty}S(s)$.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 28: Trajetória das juntas com o controlador H-infinito. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 29: Torques aplicados nas juntas com o controlador H-infinito. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 30: Velocidade angular das juntas com o controlador H-infinito. Caso nominal.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 31: Trajetória das juntas com o controlador H-infinito. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 32: Torques aplicados nas juntas com o controlador H-infinito. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 33: Velocidade angular das juntas com o controlador H-infinito. Caso com distúrbios e incertezas paramétricas.

Fonte: elaborada pelo autor.

controlador H-infinito apresentou erros bastante pequenos mas não para todas as variáveis, resultando assim em valores maiores quando comparados aos outros controladores aplicados.

O movimento realizado pelo manipulador espacial com os controladores aplicados é mostrado na Figura 34, onde a ordem dos movimentos segue do tom mais claro de cinza para o mais escuro.

5.4 Discussão de resultados

Integral de torques nos atuadores e norma $\mathcal{L}_2$ do vetor de estados, mostradas nas equações 5.6 e 5.7 respectivamente, foram empregadas como índices de performance para comparar quantitativamente os três sistemas de controle considerados, resultando na Tabela 11.

$$\mathcal{L}_2[x] = \left(\frac{1}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} \|x(t)\|_2^2 dt \right)^{1/2}. \quad (5.6)$$

$$E_\tau = \int_{t_0}^{t_f} \tau(t) dt. \quad (5.7)$$

A Tabela 11 mostra que o controlador RLQR resulta em menor esforço exigido de atuadores, e portanto maior economia de combustível e baterias durante uma operação prática. Por outro lado, o controlador por modos deslizantes seria mais adequado para

Figura 34: Movimento realizado pelo manipulador espacial planar de base livre flutuante com dois braços.

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 11: Índices de performance.

Controlador	Integral de torques [Nms]	$\mathcal{L}_2[x]$
RLQR	1.4687	0.5536
Modos deslizantes	1.7069	0.0191
H-infinito	1.5257	0.5666

Fonte: elaborada pelo autor.

tarefas de alta precisão uma vez que sua norma $\mathcal{L}_2$ do vetor de estados (erros) apresenta o menor valor.

6 CONCLUSÃO

Sistemas robóticos têm representado papéis fundamentais em operações espaciais. Minimizar o consumo de combustível e energia elétrica, consequentemente maximizando a vida útil em órbita, torna-se então uma tarefa crucial no planejamento das missões. Contudo, tais robôs devem ser capazes de realizar com destreza as tarefas que seriam executadas por astronautas, e para tanto seus sistemas de controle devem ser projetados de forma criteriosa para atender os requisitos de desempenho. Assim, neste trabalho foram aplicados diferentes controladores sobre o modelo de um manipulador de base livre flutuante com dois braços, buscando uma análise do comportamento do sistema perante a presença de distúrbios e incertezas.

O método de modelagem pelo Manipulador Dinamicamente Equivalente foi usado para mapear os movimentos dos efetadores do manipulador de base livre flutuante através de dois manipuladores de base fixa sub-atuados. Dessa forma, técnicas de controle já conhecidas para robôs de base fixa puderam ser aplicadas com sucesso sobre o modelo do manipulador espacial, comprovando assim as vantagens desse método.

Foram considerados três diferentes controladores: Regulador Linear Quadrático Recursivo Robusto (RLQR), Adaptativo com Modos Deslizantes e H-infinito robusto. Todos apresentaram desempenho satisfatório tanto para o caso nominal como para o caso no qual foram inseridos distúrbios e incertezas sobre o modelo. Para a análise quantitativa dos resultados foram empregados, como índices de desempenho, a integral do vetor de torques e a norma $\mathcal{L}_2$ do vetor de estados composto por erros de acompanhamento. Mesmo que os três sistemas de controle fossem capazes de seguir as trajetórias de referência com erros bastante pequenos, os índices mostraram que o RLQR resultou em menor esforço dos atuadores e, consequentemente, haveria possivelmente uma economia de combustível e energia elétrica em uma aplicação prática. Por outro lado, o controlador por modos deslizantes apresentou maior precisão de movimentos do efetador por apresentar a menor norma $\mathcal{L}_2$ do vetor de estados ao seguir as trajetórias definidas para os efetadores. Ainda assim, não se pode fazer uma generalização ou comparar de forma suficientemente justa o desempenho dos controladores considerados neste trabalho, uma vez que tal desempenho depende da tarefa a ser realizada, das trajetórias a serem seguidas e de gastos energéticos bastante próximos.

Sobre trabalhos futuros, sugere-se que os controladores implementados em simulações sejam aplicados em experimentos com o manipulador espacial de base livre flutuante considerado neste trabalho. Seria possível ainda combinar os sistemas de controle com técnicas de planejamento de trajetória visando otimizar os torques aplicados sobre as juntas e evitar obstáculos. O fato de o manipulador possuir dois efetadores possibilitaria

ainda a realização de tarefas cooperativas, como captura e deslocamento de objetos.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, R. A. **Modelagem e Controle de Robô Manipulador de Base Livre Flutuante com Dois Braços**. 2015. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2015.
- CHACIN, M.; MORA, A.; YOSHIDA, K. Motion control of multi-limbed robots for asteroid exploration missions. **IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA '09**, IEEE, p. 3037 – 3042, 2009.
- HENMI, T.; DENG, M.; INOUE, A. Adaptive control of a two-link planar manipulator using nonlinear model predictive control. **International Conference on Mechatronics and Automation**, IEEE, p. 1868 – 1873, 2010.
- HU, B.; CHEN, M.; ZOU, H.; CHEN, H.; CHEN, F. Control of a manipulator for replacing the orbit replacement unit on the space station. **Conference on Robotics and Biomimetics**, IEEE, p. 1548 – 1553, 2015.
- LEWIS, F. L.; DAWSON, D. M.; ABDALLAH, C. T. **Robot Manipulator Control - Theory and Practice**. 2. ed. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc, 2004.
- LI, J.; CHU, Z. The chattering-eliminating sliding mode controller of multi-arm space manipulator for coordinated operation. **2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems (MFI)**, IEEE, 2014.
- LIANG, B.; XU, Y.; BERGERMAN, M. Dynamically equivalent manipulator for space manipulator system. 1. **Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, IEEE, v. 4, p. 2765 – 2770, 1997.
- LIANG, B.; XU, Y.; BERGERMAN, M.; LI, G. Dynamically equivalent manipulator for space manipulator system. 2. **Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '97)**, IEEE, v. 3, p. 1493 – 1499, 1997.
- MENON, C.; BUSOLO, S.; COCUZZA, S.; ABOUDAN, A.; BULGARELLI, A.; BETTANINI, C.; MARCHESI, M.; ANGRILLI, F. Issues and solutions for testing free-flying robots. **Acta Astronautica**, Elsevier, v. 60, n. 12, p. 957–965, 2007.
- NAGHIBI, S. R.; PIRMOHAMADI, A. A.; MOOSAVIAN, S. A. Control of flexible-joint underactuated manipulators in task space. **Proceedings of the 4th International Conference on Robotics and Mechatronics**, IEEE, p. 1 – 6, 2016.
- NAHAVANDI, S. A.-W. S. A. A.-S. H. A. S. Integral sliding mode controller for trajectory tracking of a phantom omni robot. **International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC)**, IEEE, p. 6 – 12, 2016.
- NASA. **Reference Guide to the International Space Station**. 2015. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/np-2015-05-022-jsc-iss-guide-2015-update-111015-508c.pdf>>.

OUYANG, P. R.; TANG, J.; YUE, W. H. Adaptative pd plus sliding mode control for robotic manipulator. **International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)**, IEEE, p. 930 – 934, 2016.

PAPADOPOULOS, E.; DUBOWSKY, S. On the nature of control algorithms for free-floating space manipulators. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, IEEE, v. 7, n. 6, p. 750–758, 1991.

PAZELLI, T. de F. P. A. T. **Montagem e Controle H_∞ Não Linear de Manipuladores Espaciais com Base Flutuante**. 2011. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2011.

PAZELLI, T. F. P. A. T. **Controladores adaptativos não-lineares com critério H_∞ aplicados a robôs espaciais**. 2006. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2006.

PAZELLI, T. F. P. A. T.; TERRA, M. H.; SIQUEIRA, A. A. G. Experimental investigation on adaptive robust controller designs applied to a free-floating space manipulator. **Control Engineering Practice**, Elsevier Ltd., v. 19, n. 4, p. 395–408, 2011.

PEREZ, J.; POMARES, J.; EMAMI, M. R. Image-based control of satellite-mounted robot manipulators. **7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering**, IEEE, p. 346 – 351, 2016.

SHI, L.; KATUPITIYA, J.; KINKAID, N. A robust attitude controller for a spacecraft equipped with a robotic manipulator. **American Control Conference (ACC)**, IEEE, p. 4966 – 4971, 2016.

SIQUEIRA, A. A. G.; TERRA, M. H.; BERGERMAN, M. **Robust Control of Robots: Fault Tolerant Approaches**. 1. ed. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

TERRA, M. H.; CERRI, J. P.; ISHIHARA, J. Y. Optimal robust linear quadratic regulator for systems subject to uncertainties. **Transactions On Automatic Control**, IEEE, p. 2586 – 2591, 2014.

WAN, K.; WU, A.; LIU, H.; DONG, N. Trajectory tracking of 3-dof spatial robot manipulator. **12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)**, IEEE, p. 3259 – 3264, 2016.

WANG, H.; GUO, D.; XU, H.; CHEN, W.; LIU, T.; LEANG, K. K. Eye-in-hand tracking control of a free-floating space manipulator. **Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, IEEE, 2017.

WANG, H.; XU, S. On the adaptive zero reaction control of free-floating space manipulators. **Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation**, IEEE, p. 4600 – 4605, 2014.

XU, G.; ZHANG, M. Robust control of one arm space manipulator with parameters uncertainties compensated. **International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing**, IEEE, p. 206 – 209, 2011.

YOSHIDA, K. A general formulation for under-actuated manipulators. **Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 97)**, IEEE, p. 1651 – 1657, 1997.

ZHANG, T.; LIU, C.; QIAN, Z.; ZHANG, D.; GUPTA, M. M.; ZHANG, W. Configuration synthesis of underactuated resilient robotic systems. **2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)**, IEEE, p. 721 – 726, 2014.

ZHENG CANG, C.; YUQUAN, L.; LUO, H. Analysis of dynamics of a floating-base n-dof space manipulator system. **The 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics**, IEEE, p. 233 – 237, 2016.